

海洋牧場における魚群行動制御技術に関する研究

—水塊カーテンの水理特性と制御効果—

Study on Fish Behavior Control Method for Marine Ranch

— Hydrodynamic Properties of Water Curtain and Its Control Efficiency to Young Red Sea Breams —

糸淵長敬*・瀬戸雅文*・大竹臣哉**・中村 充**

Chokei. Itosu, Masabumi. Seto, Sinnya, Otake and Makoto. Nakamura

The buoyant jets issuing vertically upwards into stagnant ambient fluid, which we call a "water curtain", are expected to utilize as a fish screen to control fish behavior by fencing a water body with the buoyant jets. There have been many studies of vertical buoyant jets, in the previous studies, the Gaussian error curve is assumed to give an adequate approximation to the actual velocity and concentration distribution. In the present paper, we develop theoretically the diffusion problem of jets by assuming the discontinuity of density on the boundary between jet and ambient fluid, which is verified by experiments.

The equations deduced to evaluate the entrainment of ambient fluid, velocity and density are shown to be very simple in comparison with the usual equations, and have good accuracy for practical use. The experiments using fish (red sea breams) show that the control efficiency is very good to young breams.

Keywords: (buoyant jet, water curtain, fish behavior)

1. はじめに

沿岸水域において水産生物を増産するための一方法として、日本各地の十数カ所の海域で海洋牧場構想の実証実験が行われている。これら海洋牧場計画では、魚の学習に基づく音響馴致法が採用されているが、馴致効果を漁獲対象サイズまで持続させることは困難であるといわれる。しかし音響馴致に代わる、より安価で効果的な魚群行動制御技術は未開発である。本研究は周囲水と異なる水塊でカーテン状バリアーを造ることによって魚群行動を制御しようとするもので、カーテンと周囲水との環境要素（水温、塩分、浸透圧）の変化率（不連続性）および魚の忌避濃度が問題となる。このような立場から、鉛直密度噴流に関してあらためて検討するとともに、行動制御効果の実験を行った。

水塊カーテンを形成する方法には、周囲水より軽い水塊を底面よりカーテン状に噴流させる方法（密度噴流方式）と重い水塊を水面より噴出する（重力噴流方式）方法が考えられる。本研究ではまず密度噴流方式における水塊カーテン内密度変化に関する理論の再検討を行った。鉛直密度噴流に関する研究は Tollmien,¹⁾ Rouse et al.²⁾ をはじめ現在まで数多くの研究があり、特に発電所における温排水に関する実用上の必要もあって Tamai³⁾ 和田ら,⁴⁾ を含めて実用的な解がある。

噴流の可視化実験および輝度測定による濃度分布実験によると、各瞬間におけるカーテン水塊と周囲水との境界は不連続に存在し、時間平均をとったときに境界付近の渦の不規則性やゆらぎなどで Gauss 分布に近い濃度分布をとることが分かる。このことは、魚群は環境水の平均濃度に対して反応するのではなく瞬間濃度に対して反応するから、魚群行動に対しては重要である。

2. 理論的検討

本研究における可視化実験の一例を図1に、また、輝度測定による噴流内の濃度分布を図2(a)に、同じ断面における時間平均濃度分布を図2(b)に示す。図1、図2(a)から噴流水塊と周囲水の境界は前節で述べたように不連続に存在し、時間平均をとると境界付近の渦の不規則性やゆらぎなどで Gauss 分布に近い濃度分布をとることが判る。従来の研究における解析は図2(b)の状況を対象としており、この理論解析の原点

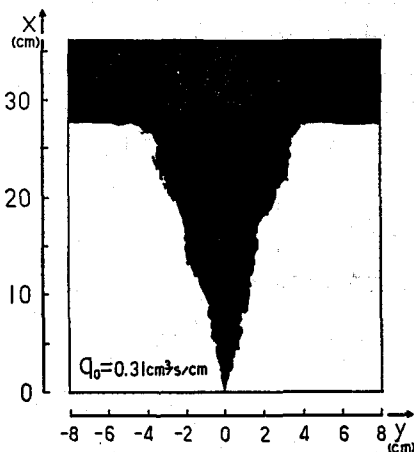


図1 噴流可視化実験の一例

*正会員 東京水産大学海洋生産学科 (108 港区港南4-5-7) .

**正会員 福井県立大学生物資源学部海洋生物資源学科

には、(1)カーテンと周囲水の界面せん断力は渦粘性係数に平均速度シアーを乗じたものに等しい、(2)流速や密度の分布は予め Gauss分布としている、等の条件がある。この二つの条件は流速 u 、密度 ρ の平均量を扱う立場のもので図1、図2(a)に示すように時々刻々の瞬時には噴流と周囲水の界面が滑らかに接続することはない。従って、本研究では界面を不連続として解析する。このことは特に前節で述べた魚群行動に対して重要である。

図3に理論解析におけるモデルを示す。二次元密度噴流に関する運動量保存則は玉井⁵⁾によると、

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} = -\frac{\rho}{\rho_1} g - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (1)$$

但し、 ρ_1 は周囲水の密度、 ρ は x 点における噴流密度、 τ はせん断力である。

式(1)を噴流の幅(y 方向、 $-b$ から $+b$ まで)方向に、圧力項にBoussinesq近似が成立するとして積分すると、

$$2Bu \frac{du}{dx} + 2(uv)_{y=b} = \left(\frac{\rho_1 - \rho}{\rho_1} \right) gB \quad (2)$$

ただし誘導の過程で $v_{y=b} = -v_{y=-b}$ 、 $\tau_{y=b} = \tau_{y=-b}$ の関係を使っている。一方、連続の式も同様に積分すると、 $2v_{y=b} = -Bdu/dx$ 。これを式(2)に代入し整理すると

$$\left((\rho_1 - \rho) / \rho_1 \right) gB = Bu (du/dx) = u (dq/dx) \quad (3)$$

$$\text{故に } (\rho_1 - \rho) gB dx - \rho_1 u dq = 0 \quad (4)$$

ただし dq は進行流量である。

式(3)は x 点における密度噴流の幅を B とすると、 Bdx なる要素について、要素に働く力の合計は現象が定常であることから、浮力と周囲水の噴流内連行にともなう運動量の変化により生ずる接面力(τ)が釣り合っていると理解できる。これを図示したのが図3である。

また図3に見るように $B = kx = 2 \tan \theta \cdot x$ 、また $u = q/B$ の関係を使い式(4)を整理すると

$$gk^2 x^2 dx = \frac{\rho_1}{(\rho_1 - \rho)} q dq \quad (5)$$

ρ 、 q 、 x をそれぞれ ρ_0 、 q_0 、 h で無次元化し、この無次元量に*印を付けて示せば

$$\frac{gk^2 h^3}{q_0^2} x^{*2} dx^* = \frac{\rho_1^*}{\rho_1^* - \rho^*} q^* dq^* \quad (6)$$

ここに、 ρ_0 および q_0 は放流口($x=0$)における密度および流量、 h は放流口の水深である。

(5)、(6)式における ρ 、 ρ^* は q_0 に対する希釈倍率 $q^* (= q/q_0)$ の関数であるので

$$\rho = \frac{\rho_0 q_0 + \rho_1 (q - q_0)}{q} \quad (7)$$

$$\therefore \rho^* = \frac{1}{q^*} + \rho_1^* \left(1 - \frac{1}{q^*} \right) \quad (8)$$

(8)式を(6)式に代入して

$$\alpha x^{*2} dx^* = \frac{\rho_1^*}{\rho_1^* - 1} q^{*2} dq^*$$

$$\therefore \frac{\alpha}{3} x^{*3} = \frac{\rho_1^*}{3(\rho_1^* - 1)} (q^{*3} + c)$$

ここで $x^*=0$ で $q^*=1$ $\therefore c=-1$

$$\therefore q^* = (\epsilon \alpha x^{*3} + 1)^{1/3} \quad (9)$$

$$\text{ここに、} \alpha = \frac{gk^2 h^3}{q_0^2}, \epsilon = \frac{\rho_1^* - 1}{\rho_1^*} = \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_1}$$

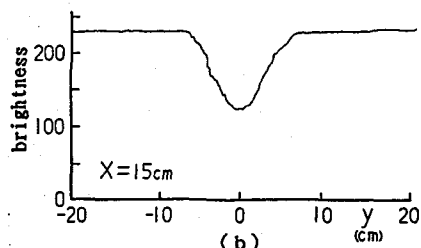
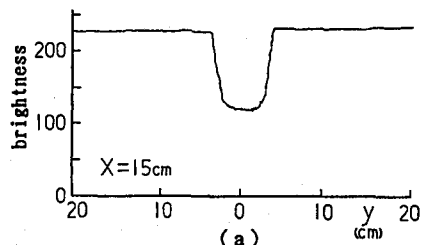


図2 輝度測定による噴流内濃度分布
瞬間分布(a)
時間平均分布(b)

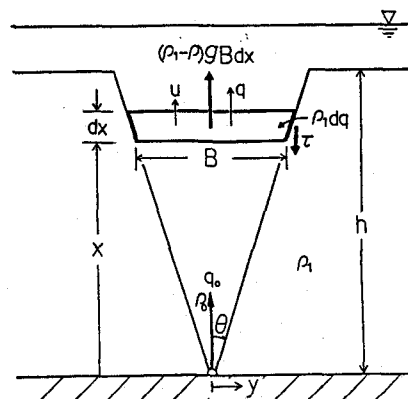


図3 理論解析モデル

ρ_1 : 周囲水密度
 q : 単位長さ流量
添え字(0)は流出口での値

よって、水深 h なる海底より密度 ρ_0 なる水を単位長さ当たり流量 q_0 で線状に放出した場合、 x だけ上の点での湧昇流量 q は(9)式で求まり、その時の密度 ρ は(8)式で求まる。従来の式に比較して極めて簡易な式で示される。また、水面における濃度は $x^2=1$ として

$$\rho_0^2 = \rho_1^2 - (\rho_1^2 - 1) / (\epsilon \alpha + 1)^{1/3} \quad (10)$$

これが魚類の忌避濃度であればよい。

3. 実験

3-1. 噴流実験

実験は図4に示すような透明な塩化ビニール水槽を用いた。水槽の奥行は20cmである。水槽底部中央に直径3cmの密度流放出用パイプを取り付け、パイプに空ける5mmのスリットにスポンジを詰め、一様に噴流が発生できるようにした。また、このパイプは定水位タンクに接続してある。実験では水槽両側面の上縁より一様に溢流させることによって水深を一定に保った。また、噴流混合水が上層を覆うが、この厚さの発達速度を調節できるように水槽の両側から周囲水と同じ水が静かに給水できるようにしてある。

観測は放出水をメチレンブルーで着色して可視化し、これをビデオカメラに記録後、画像解析装置により輝度解析を行った。さらに2本の導電率計によって塩分濃度を測定し、これと同時に1本の温度センサーで水温の測定を行った。実験の方法を図5に示す。また、実験は表1に示すように計11パターンについて行った。

3-2. マダイ稚魚の遮断実験

体長3.7~5.6cmの0才魚のマダイを実験魚として用いた。水槽は噴流実験で用いた同じ水槽を使用した。実験開始前に海水、淡水とも十分にエアレーションを行い、実験水槽にマダイ3尾を入れ、3時間ほど慣らした後、魚の行動をビデオカメラで約30分間撮影しこれをマダイの平常時の行動（ブランクテスト）とした。次に下方から淡水を噴流させ水塊カーテンを形成しマダイの行動を撮影した（制御テスト）。また、図4に示すように淡水層の発達を抑えるために水槽底の両端から海水を供給した。放出水の密度、水温は各々0.999 g/cm³、17.1℃、流量は2.07 cm³/sec/cm、また水槽底からの給水流量(q_1)を0.31 cm³/secとした。海水の密度は1.025 g/cm³、水温17.0℃、塩分34.1 ‰であった。解析には画像解析装置を用い、各魚の位置を3秒間隔で読みとった。

4. 結果

4-1. 実験結果と理論の比較

噴流の湧昇流量 q は可視化によって上層着色水の層厚の発達速度より

求めた。図.6に示す記号を用いて

$$q_h = 2\delta + q_0 + q_1 \quad (11)$$

(11)式より q_h を求めることができる。 $\delta=0$ になる

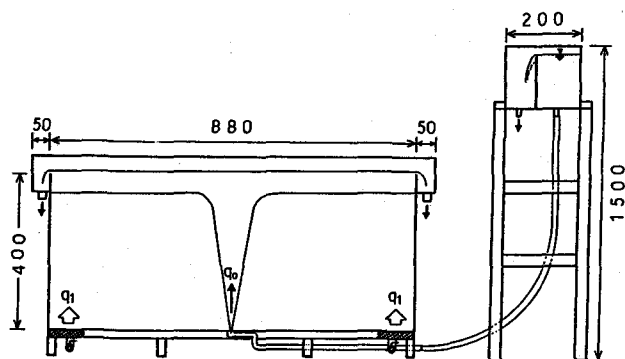


図4 実験装置の配置

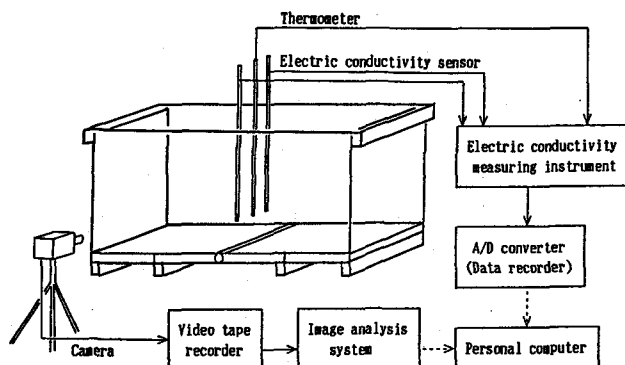


図5 測定方法およびデータ処理の流れ

表1 実験条件

Case	No	ρ_0 (g/cm ³)	ρ_1 (g/cm ³)	$\rho_1 - \rho_0$ (g/cm ³)	q_0 (cm ² /s)
I	I-1	0.999	1.0185	0.0195	0.59
	I-2	0.999	1.0185	0.0195	1.81
II	II-3	0.999	1.0200	0.0210	0.89
	II-4	0.999	1.0200	0.0210	2.13
	II-5	0.999	1.0200	0.0210	2.52
III	III-1	0.999	1.0205	0.0215	0.09
	III-2	0.999	1.0205	0.0215	0.67
	III-3	0.999	1.0205	0.0215	0.90
	III-4	0.999	1.0205	0.0215	1.00
	III-5	0.999	1.0205	0.0215	1.40
	III-6	0.999	1.0205	0.0215	1.65

ρ_0 : The density of jet.

ρ_1 : The density of surrounding fluid.

q_0 : The unit width discharge of jet.

ように q_1 を調節して求めることができるが、本実験では $q_1=0$ として、 δ をビデオを用いて計測した。

観測結果の一例を図7、図8に示す。図8は(11)式を無次元化して ($q_1=0$ の場合)

$$q_e^* = \frac{l \delta + q_0}{q_0} \quad (12)$$

として計算した値が示してある。

図8 において横軸 h は、或る x 断面における噴流の様子は x 点の下層のみに依存すると見られることから x と読みかえてもよいであろう。このことから q_e^* と x は図8 からほぼ直線関係にあることが判る。(9)式で x^* のごく小なる部分を除き $\epsilon \alpha \gg 1$ が成立ち、このとき(9)式は

$$q_e^* = (\epsilon \alpha)^{1/3} x^* \quad (13)$$

となり、図8 の関係を理解することが出来る。

図9 に(9)式による理論値 q_m^* と実験値 q_e^* の関係を示す。無次元湧昇流量 q_e^* の大きい所では若干のバラツキが見られるが、これはその位置での混合層 δ のゆらぎによる δ のバラツキと考えられる。図9 より多少のバラツキはあるものの(9)式はほぼ実験値を満足しているものと見られる。

次に密度 ρ について理論値(8)と実験値の比較を行う。

密度 ρ の測定は上層の混合層 δ の発達をなくするように(11)式より q_1 を求め、これを図6に示すように底層より流入し、現象をすべて定常化した後に行った。測定は塩分濃度 S と温度 T を各高さ x

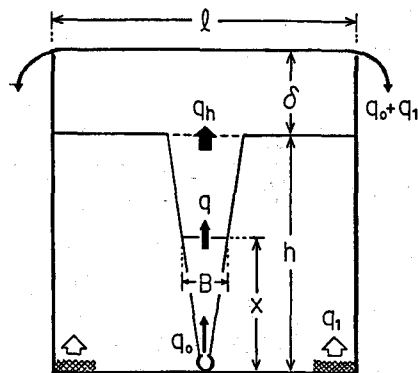


図6 湧昇流量 q を求めるモデル

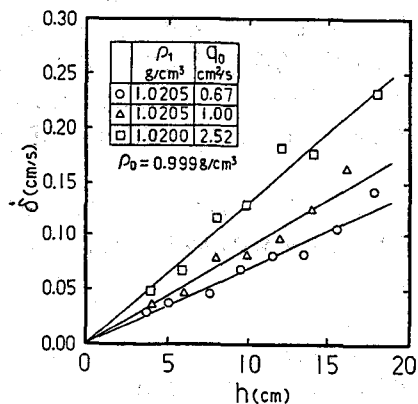


図7 上層の発達速度と下層厚みの関係

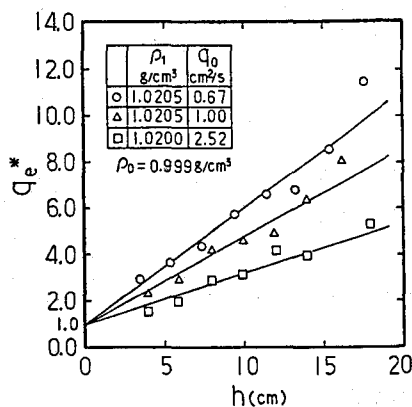


図8 無次元湧昇流量と下層厚みの関係

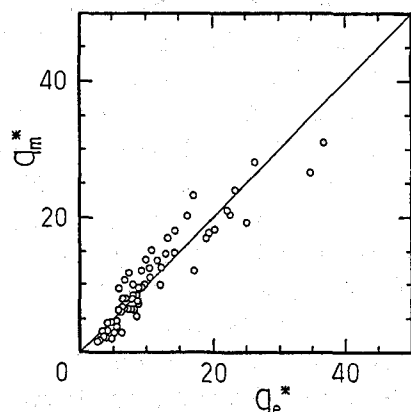


図9 無次元流量の理論値と実験値との比較

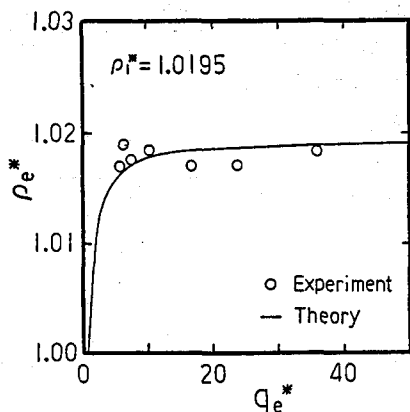


図10 無次元密度と無次元流量の関係 ($\rho_1^* = 1.0195$)

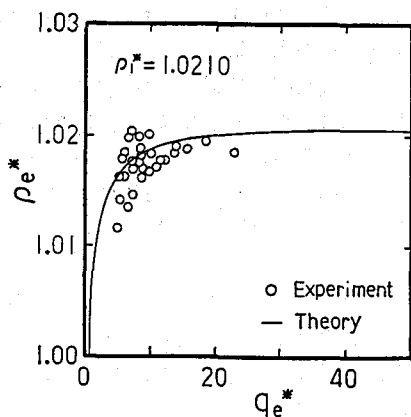


図11 無次元密度と無次元流量の関係 ($\rho_1^* = 1.0210$)

毎に行った。測定データにおいて水温値は安定しているものの塩分値は烈しく変動しているため移動平均処理を施した後解析に用いた。塩分濃度の烈しい変動は噴流のゆらぎや渦の挙動によるものである。

塩分濃度 S 、温度 T から密度 ρ を求め ρ_0 で無次元化した実験値 ρ_e^* と q_e^* の関係の一例を図10、図11に示す。図中には(8)式による理論曲線が入れてある。バラツキは多いがほぼ理論は正しいと見ることができよう。また、実験値と理論値を x 、 y 軸にとって示したのが図12である。やや理論値の方が大きな値となっているが数%であり実用上は十分と考えられる。

4-2. 行動制御実験

図13にブランクテスト（左側）および制御テスト（右側）の一例を示す。横軸は水塊カーテン境界面と魚との水平距離を示し、0のlineがカーテン水と周囲水との境界を意味する（但し、ブランクテストでは水槽底中央線を意味する）。縦軸は魚～カーテンの距離の時間変化を示す。従って、図中の実線が激しく変動していることは、魚が水平方向に活発に動いていることを示している。図13によると、水槽中央を横切ってかなり活発に運動していたが、水塊カーテン形成後はカーテンに遭遇すると明らかに忌避行動を示していることが分かる。カーテンを横切る行動は3回見られたが、このうち黒丸で示すものは噴流の上部の希釈されたところを通過した。残りは発生装置の構造上カーテンの隙間が出来ていた所を通過した。通過場所の密度を理論式(9)より求めると1.015 (g/cm³) で、このときの浸透圧は14.9 (気圧) であった。マダイ稚魚は浸透圧がこの程度になるときの忌避濃度であると思われる。

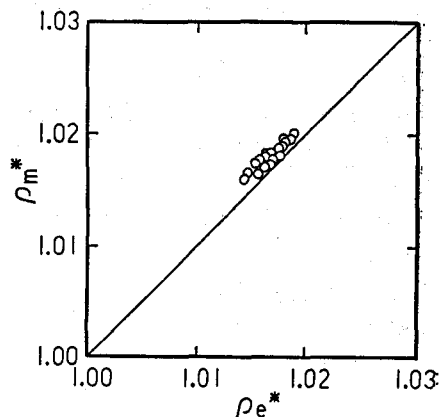


図12 無次元密度の理論値と実験値の比較
(理論値は式(8)より計算)

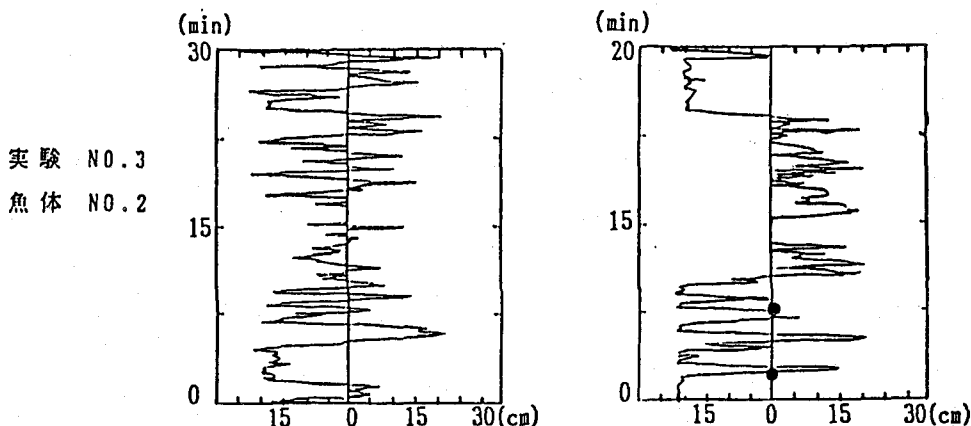


図13 マダイ稚魚行動遮断実験

(左図：ブランクテスト（カーテン無し）、右図：カーテン有り)

5. 結び

以上に水塊カーテンとしての鉛直密度噴流について、現象の観察から、噴流と周囲水の接面で流速、密度が不連続に変化するとして、理論式(9)、(8)式を導いた。この式の精度を実験的に検証した。両式型は従来の計算式に比較して極めて簡易で実用式として適しているものと考えられる。また、これを魚群行動制御に用いる場合には最も希釈された水面付近 ($x^*=1$) の濃度 ρ_e^* が魚の忌避濃度以上であればよいことになる。 ρ_e^* は(9)式で $x^*=1$ とおいた式を(8)式に代入して

$$\rho_e^* = \rho_1^* - \frac{\rho_1^* - 1}{(\epsilon \alpha + 1)^{1/3}}$$

である。

マダイ稚魚を用いた実験では水塊スクリーンで十分に通行を遮断できた。また本報告では割愛したが温度差を用いて形成した水塊カーテンのタナゴについての行動制御実験でも制御効果が認められた。しかし生物を使う実験におい

ては相似則が成立しないので、実海域あるいはそれ相当の実験を今後行う必要がある。

参考文献

- 1) W.B. Tollmien: Berechnung turbulenter Ausbreitungsvorgänge. ZAMM, 6, 468-478 (1926).
- 2) H. Rouse, C.S. Yih and H.W. Humphreys: Gravitational convection from a boundary source. Tellus, 4, 201-210 (1952).
- 3) N. Tamai: Diffusion of horizontal buoyant jet discharged at water surface. Proc. 13th Cong. IAHR, C24, 1-8 (1969).
- 4) 和田 明, 片野尚明: 工業用水の取放水問題. 第15回海岸工学講演会講演集, 15, 297-306 (1968).
- 5) 玉井信行: 密度流の水理, p79, 1980.